

ИНДУКТИВНЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЕ

УДК 539.8+53.082.7

М. М. Горшков, Ю. Н. Жугин, В. Т. Заикин,
С. В. Зверев, В. Д. Краснов, В. П. Кручинин,
В. М. Слободенюков, Д. Т. Юсупов

Всероссийский НИИ технической физики, 456770 Снежинск

Рассмотрен вариант реализации индуктивного метода измерения массовой скорости за фронтом ударной волны в конденсированной диэлектрической среде, основанного на регистрации ЭДС, возникающей в катушке с током при ее деформации ударной волной. Для помехоустойчивости применена катушка-датчик тороидальной формы. Питание катушки током (500 А) осуществлялось апериодическим разрядом емкости. Амплитуда регистрируемого сигнала ЭДС пропорциональна измеряемой массовой скорости и составляет 20 В при скорости 1 км/с. Оценено влияние некоторых явлений, сопровождающих движение ударной волны вдоль катушки, на точность измерения массовой скорости.

Известно, что параметры состояния конденсированной среды в ударной волне (УВ) определяются из законов сохранения массы и импульса по измеренным значениям волновой и массовой скоростей.

Для измерения скорости фронта волны существует метод электроконтактных датчиков [1], оптический метод клина [2] и др. Более сложно измерение массовой скорости. Например, для получения информации о скорости движения диэлектрической конденсированной среды применяются магнито-электрический [1], емкостный [3], электромагнитный [4] и индукционный [5] методы. Указанные методы позволяют осуществлять непрерывную запись скорости в течение нескольких микросекунд.

В данной работе рассмотрены вопросы применения в экспериментальных исследованиях индуктивного метода [6], основанного на измерении ЭДС индукции, возникающей в специальной катушке с током при ее деформации УВ. Как и в магнито-электрическом методе, измеряемая массовая скорость является линейной функцией амплитуды регистрируемого сигнала. Время непрерывной регистрации скорости среды зависит от высоты катушки и может составлять единицы или десятки микросекунд. Имеется возможность определения волновой скорости (среднего значения на базе измерения, равной высоте катушки). Индуктивный метод применим как в лабораторных исследованиях, так и в измерениях при крупномасштабных (например, подземных) взрывах.

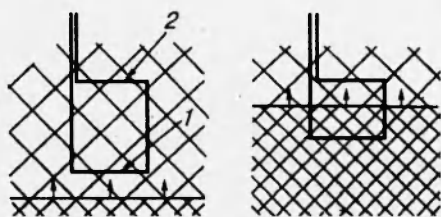


Рис. 1. Схема деформации витка ударной волной

ПРИНЦИП ИНДУКТИВНОГО МЕТОДА

Пусть прямоугольный виток индуктивностью L подключен к источнику постоянного тока I_0 и расположен в конденсированной диэлектрической среде (рис. 1). По диэлектрику движется УВ, фронт которой параллелен участку 1 витка. С приходом УВ к витку проводник смещается вместе с движущейся средой, изменяя индуктивность витка. При условии полного увлечения витка частицами среды, на его выводах появится ЭДС индукции

$$E = -I_0 \frac{dL}{dt} = -I_0 \frac{dL}{da} \cdot \frac{da}{dt} = -I_0 \frac{dL}{da} u,$$

где t — время регистрации, a — высота витка, u — скорость среды. Если форма витка такова, что индуктивность пропорциональна высоте витка ($dL/da = k$), то скорость среды является линейной функцией регистрируемого сигнала ЭДС:

$$u(t) = \frac{E(t)}{kI_0}.$$

Приход фронта УВ к участку 2 витка и увлечение его средой вызывает сброс сигнала ЭДС. Это позволяет определять скорость распространения фронта волны в исследуемой среде как отношение исходной высоты витка к длительности сигнала.

ПРИМЕР ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Для увеличения амплитуды сигнала ЭДС в качестве чувствительного элемента применен не один виток, а катушка индуктивности тороидальной формы с каркасом прямоугольного сечения. Выбор формы катушки обосновывается тем, что, в отличие от поля соленоидов, магнитное поле тороида замкнуто внутри катушки и поэтому менее подвержено воздействию внешних электромагнитных возмущений. Каркас катушки изготавливался из материала исследуемой среды либо из материалов, близких к нему по динамической жесткости. Предполагалось отсутствие шунтирования обмотки из-за возможного изменения диэлектрических свойств среды при ударном нагружении. Для обмотки использовалась алюминиевая лента толщиной 0,5 и шириной 7 мм. Лента устанавливалась в пазах каркаса на эпоксидном компаунде. Другие параметры катушки определены постановкой конкретных измерений (скорость среды 0,5–2,5 км/с, время регистрации 20 мкс): высота катушки $a = 100$ мм, внешний диаметр $d_1 = 100$ мм, внутренний диаметр $d_2 = 50$ мм, число витков $N = 16$.

Ток в цепи катушки создавался разрядом конденсаторов по схеме рис. 2. Стабилизация тока достигается включением в цепь буферной катушки с индуктивностью 200 мкГн при малой паразитной емкости (80 пФ). При выбранных параметрах схемы разряд конденсаторов происходит по апериодическому закону с максимумом тока 500 А в момент

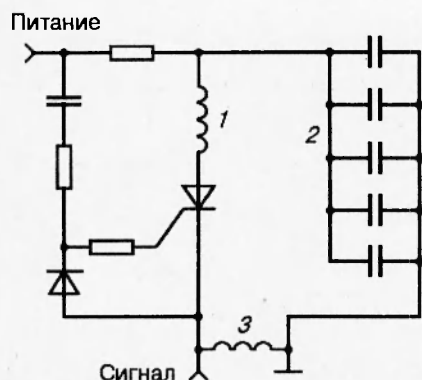


Рис. 2. Схема источника тока для питания катушки-датчика:

1 — буферная катушка (200 мкГн); 2 — конденсаторы (4700 мкФ, 250 В); 3 — катушка-датчик (4 мкГн)

времени ≈ 1500 мкс. Вблизи максимума (± 200 мкс) изменение силы тока не превышает 0,05 А/мкс, т. е. практически в цепи катушки протекает постоянный ток. Постоянное напряжение заряда (230 В) и пусковой импульс подаются на вход «Питание». Падение напряжения на активном сопротивлении катушки, регистрируемое с целью определения силы тока в цепи, и ЭДС индукции, возникающая в катушке с приходом УВ, снимаются с выхода «Сигнал». Записывается сигнал цифровыми (СУПИ-24) и осциллографическими (СУР-1) регистраторами. Амплитуда сигнала ЭДС в катушке при токе 500 А и скорости среды 1,5 км/с составляет 30 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Зависимость индуктивности от высоты катушки. Формула для расчета индуктивности тороидальной катушки [7] дает линейную связь индуктивности с высотой:

$$L = 0,0004606 N^2 a \lg(d_1/d_2).$$

Линейность зависимости $L(a)$ подтверждена измерениями на реальной катушке:

$$L = ka, \quad \delta_L = 0,05 \text{ мкГн},$$

где $k = 0,0398$ мкГн/мм; δ_L — изменение индуктивности. Высота катушки варьировалась в пределах 100 ÷ 50 мм, индуктивность измерялась прибором Е7-5А с точностью $\pm 2\%$. Таким образом, для рассматриваемого варианта применения индуктивного метода в выражении для расчета скорости движения среды можно принять

$$\frac{dL}{da} = \frac{L}{a} = \frac{L_0}{a_0},$$

где L_0, a_0 — исходные индуктивность и высота катушки.

Изменение электрического сопротивления обмотки в ударной волне. Источником ошибки измерения скорости индуктивным методом может быть наложение на регистрируемое значение ЭДС сигнала ΔV , вызванного изменением сопротивления ΔR алюминиевой обмотки при ударном сжатии

$$\Delta V = I_0 \Delta R.$$

Количественных данных по электропроводности алюминия при ударном нагружении в литературе авторами не найдено. Для оценок были проведены следующие измерения.

Проводник из алюминия толщиной 0,2 и шириной 4 мм ($R_0 = 20$ мОм), выполненный в виде плоской синусоиды, устанавливался на эпоксидном клее между слоями мрамора. По проводнику пропусклся постоянный ток 500 А. Мрамор нагружался плоской УВ с давлением 230 кбар. Записывалось постоянное напряжение V_0 на проводнике с исходным сопротивлением R_0 , а затем напряжение V на проводнике, подвергнутом воздействию УВ. За время регистрации (2 мкс) значение V оставалось постоянным в пределах $\pm 7\%$. По данным двух опытов изменение сопротивления алюминия составило $\Delta R = (V/V_0 - 1)R_0 = nR_0$, $n = 0,26 \pm 0,03$.

Полученные данные позволяют оценить величину сигнала, накладывающегося на ЭДС в опытах с индуктивным датчиком. При общем сопротивлении тороидальной катушки 50 мОм сопротивление торцевой части обмотки, подвергаемой воздействию УВ, составляет 5 мОм. При токе 500 А паразитный сигнал

$$\Delta V = nR_0 I_0 = 0,65 \text{ В},$$

что составляет 2% от амплитуды сигнала ЭДС ($E = -30$ В) при скорости 1,5 км/с. Таким образом, изменение сопротивления обмотки приводит к некоторому занижению получаемого значения скорости. Поэтому, когда возможны количественные оценки, данный фактор следует учитывать введением соответствующей поправки.

Влияние различия динамических жесткостей материалов каркаса и обмотки. Так как материал обмотки (алюминий) по динамической жесткости превосходит материалы каркаса катушки (пластмассы, горные породы и др.), то при прохождении УВ возможно искажение прямоугольной формы витка, приводящее к ошибке в регистрации ЭДС и, следовательно, в получаемом значении скорости среды.

Определение характера деформации витка проводилось рентгенографическим методом. Элемент алюминиевой обмотки катушки устанавливался в оргстекло, нагружаемое плоской УВ затухающего профиля. Рентгеновский импульс длительностью $\approx 0,2$ мкс выдавался через 0,9, 2,6 и 4,3 мкс после прихода фронта волны к витку. Величина массовой скорости составляла 2 км/с на фронте волны и уменьшалась до 1 км/с к моменту времени 4,3 мкс.

На рентгенограммах, полученных в опытах, зафиксировано отставание участков «перекладины» 1 витка (см. рис. 1), прилегающих к вертикальным «стойкам». При этом площадь S , пересеченная «перекладиной», оказывается меньше, чем в случае идеального увлечения витка средой (S_0). Среднее значение отношения $S/S_0 \approx 0,98$. При деформации прямоугольного витка с током значение ЭДС пропорционально скорости изменения площади витка, следовательно, $E \approx 0,98E_0$. Таким образом, в опытах с индуктивным датчиком при таком сочетании материалов обмотки и каркаса катушки, как алюминий и оргстекло, возможна регистрация заниженного на 2% значения ЭДС и, следовательно, скорости. При лучшем согласовании динамических жесткостей материалов (например, алюминий и мрамор, магний и оргстекло) эффект занижения скорости будет меньшим и для исключения систематической ошибки достаточно внести положительную поправку +1%.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Рассматриваемый вариант индуктивного датчика предназначен для измерения параметров УВ при сильном подземном взрыве. Для проверки работы датчика проведены измерения на взрывных генераторах плоской УВ.

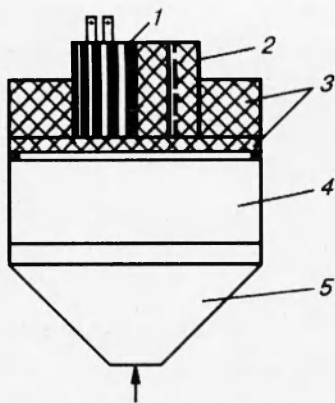


Рис. 3. Постановка опытов с индуктивным датчиком в мраморе:

1 — обмотка катушки; 2 — каркас; 3 — диск (15 мм), кольцо (60 м); 4 — заряд тротила диаметром 200 и высотой 100 мм; 5 — генератор плоской волны

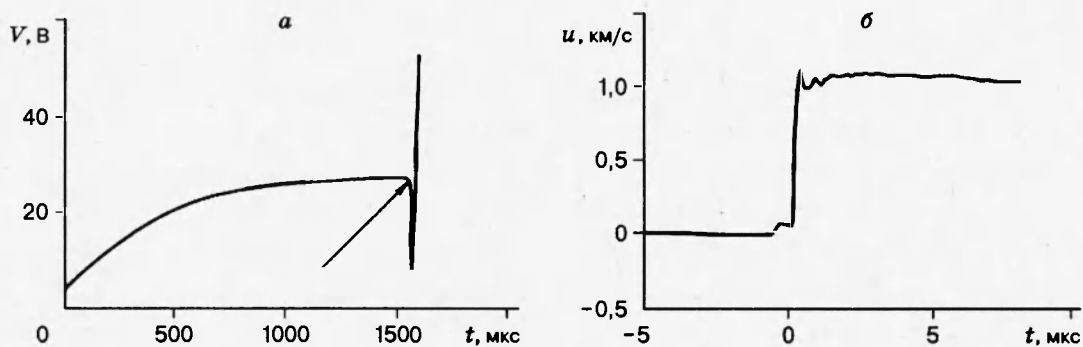


Рис. 4. Результат опыта с датчиком в мраморе:

а — запись сигнала на развертке 4000 мкс (стрелкой отмечен момент прихода ударной волны к катушке), б — профиль массовой скорости в мраморе

В опытах с мрамором (поликристаллический кальцит плотностью $2,70 \text{ г/см}^3$) УВ в образце создавалась торможением продуктов детонации тротила через пятимиллиметровый воздушный промежуток. Катушка, состоящая из алюминиевой обмотки на мраморном каркасе, устанавливалась в образец на эпоксидном клее, как показано на рис. 3. При реализуемом в опытах давлении нагружения мрамора (160 кбар) наиболее вероятным является существование двухволновой структуры с амплитудой упругого предвестника ≈ 8 кбар [8], малой в сравнении с амплитудой пластической волны.

Запись сигнала с катушки осуществлялась цифровым регистратором СУПИ-24 на развертке 4000 мкс (частота дискретизации 1 МГц) и 82 мкс (50 МГц). Результаты измерений, полученные в одном из опытов, приведены на рис. 4, а, где воспроизведена полная запись напряжения на катушке с момента начала разряда конденсаторов до разрушения выводов катушки, и приведен (рис. 4, б) профиль массовой скорости, рассчитанный по записанному в опыте сигналу ЭДС.

Величина скорости в упругой волне (0,05–0,1 км/с) соответствует данным [8] для кальцита. Скорость на фронте пластической волны (с учетом поправки +2,5%) составила 1,09 км/с. Данное значение массовой скорости близко к величине (1,08 км/с), полученной независимо по измеренной электроконтактами скорости фронта (5,40 км/с) и ударной адиабате мрамора (по данным авторов, в интервале массовой скорости 1–4 км/с):

$$D = 3,838 + 1,452u.$$

В опытах с бетоном (плотность $2,04 \text{ г/см}^3$) для каркаса катушки применены материалы, близкие к бетону по динамической жесткости: стеклотекстолит ($1,88 \text{ г/см}^3$) и фторопласт-4 ($2,21 \text{ г/см}^3$). Для создания УВ использовались плосковолновый генератор и заряд из сплава тротила с гексогеном диаметром 600 и высотой 100 мм. Бетонный блок располагался с 30-миллиметровым воздушным промежутком по отношению к заряду.

Измерения показали, что алюминиевая обмотка «живет» в течение всего времени прохождения волны по катушке: время непрерывной записи составило ≈ 25 мкс. Значения массовой скорости на фронте волны зарегистрированы в разумных пределах ($1,04\text{--}1,10 \text{ км/с}$). Следует отметить некоторое влияние поляризационных эффектов на качество записей сигнала ЭДС в опытах со стеклотекстолитовой катушкой.

Результаты изучения работы датчика и первые эксперименты по измерению скорости среды свидетельствуют о возможности успешного применения индуктивного метода в исследованиях ударно-волновых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи физ. наук. 1965. Т. 85, вып. 2. С. 197–258.
2. Campbell A. W., Davis W. C., Ramsay J. B., Trevis J. R. Shock initiation of solid explosives // Third Symp. on Detonation. Office of Naval Research, 1960. P. 499–519.
3. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для измерения мгновенной скорости движущейся поверхности // Приборы и техника эксперимента. 1963. № 1. С. 135–138.
4. Фритц, Морган. Электромагнитный метод измерения скорости частиц вещества // Приборы для научных исследований. 1973. № 2. С. 119–125.
5. Жугин Ю. Н., Крупников К. К. Индукционный метод регистрации скорости конденсированной среды в ударно-волновых процессах // ПМТФ. 1983. № 1. С. 102–108.
6. А.с. 471536 СССР, МКИ. Индуктивный датчик для регистрации скорости распространения ударной волны / Л. П. Волков, Ю. Н. Жугин. Оpubл. 25.05.75. Бюл. № 33.
7. Справочник по радиотехнике / Под ред. Б. А. Смирнина. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950.
8. Grady D. E. Processes occurring in shock wave compression of rock and minerals // High Pressure Research: Application in Geophysics. New York: Acad. Press, 1977. P. 389–438.

Поступила в редакцию 31/VIII 1995 г.
